

NATURALEZA DE LA LUZ. DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO

1. TEORÍAS SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ

Las hipótesis sobre la naturaleza de la luz con un carácter más científico arrancan del siglo XVII, y desde ese momento han coexistido dos modelos fundamentales para explicar el comportamiento de la luz: el modelo corpuscular y el modelo ondulatorio.

a) **El modelo corpuscular:** defendido por Newton y sus seguidores, considera la luz formada por pequeñísimos corpúsculos emitidos por los cuerpos luminosos: estos corpúsculos son emitidos por las "fuentes de luz" y, al reflejarse sobre los objetos e incidir sobre nuestros ojos permite que los veamos.

Este modelo explica fácilmente la propagación rectilínea de la luz, y fenómenos como la formación de sombras y la reflexión. (Ventajas del modelo de Newton)

Para explicar la refracción Newton tenía que suponer que la velocidad de la luz era mayor en los medios de mayor densidad (esto es falso), lo cual parecía un poco extraño. Además, los fenómenos de difracción e interferencias, de los cuales tenía conocimiento el propio Newton, eran muy difíciles de explicar con un modelo corpuscular. (Esto último son inconvenientes del modelo de Newton)

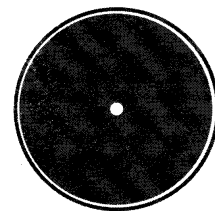
b) **El modelo ondulatorio:** consideraba a la luz como una onda longitudinal similar a la del sonido. Era defendido por Huygens y por Hooke y también explicaba la propagación, la reflexión y la refracción de la luz, aunque inicialmente era un modelo poco desarrollado desde el punto de vista matemático. Por otro lado, era más complicado explicar las sombras y la propagación rectilínea mediante las ondas que con el modelo corpuscular.

Para explicar la refracción el modelo ondulatorio tenía que suponer que la velocidad de la onda debía ser menor en el medio más denso (lo cual es cierto). Sin embargo el prestigio que tenía Newton, la influencia de la mecánica que había alcanzado logros muy importantes y la escasa habilidad de Huygens para el desarrollo matemático hicieron que la balanza se inclinara durante cerca de dos siglos, XVII y XVIII, del lado del modelo corpuscular.

Alrededor de 1800, se desarrolló el modelo ondulatorio por parte de Young y por Fresnel. Hubo un cambio sustancial y es que la luz pasó a considerarse una onda de tipo transversal, en lugar de longitudinal como lo había sido al comienzo del modelo ondulatorio.

Cuando Fresnel propuso la teoría ondulatoria para explicar los fenómenos de difracción e interferencia no fue inmediatamente aceptada por todos.

La figura representa la sombra de una moneda circular cuando es iluminada por un haz de luz monocromática. Lo relevante de la misma es el punto brillante central, que según el modelo corpuscular no debería aparecer nunca. Fíjate que está justo en el centro de la sombra y no tiene sentido que aparezca ahí una mancha brillante suponiendo que la luz fuesen corpúsculos emitidos por el foco luminoso.



Realizada la experiencia y comprobado el hecho de que aparecía la mancha brillante, la teoría ondulatoria ganó una importantísima batalla en su controversia con la teoría corpuscular.

El modelo ondulatorio fue ganando adeptos y su aceptación culminó cuando se midió la velocidad de la luz en diversos medios, encontrando que era menor en los medios más densos, tal como había sido predicho por el modelo ondulatorio y en contra de lo que se suponía en el modelo corpuscular.

c) **La teoría electromagnética de la luz:** En realidad puede ser incluida dentro del modelo ondulatorio, pues considera a la luz como la propagación de ondas electromagnéticas de frecuencias comprendidas entre unos determinados límites.

Las principales características de la teoría electromagnética de Maxwell de la luz son las siguientes:

- * La luz y las demás O.E.M.(ondas electromagnéticas) consisten en la propagación de campos eléctricos y magnéticos variables, perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de la propagación. Los valores máximos de esos campos eléctricos y magnéticos están relacionados: $B_0 = E_0/c$
- * La luz y las demás O.E.M. poseen y transportan cantidad de movimiento y energía. La cantidad de movimiento y la energía están relacionadas: $p = E/c$
- * Las O.E.M. son emitidas por partículas con carga eléctrica que tengan movimiento acelerado. La amplitud del campo eléctrico y magnético variable depende de la aceleración de la partícula con carga eléctrica. Esa aceleración puede tener, en principio, cualquier valor. Eso significa que E_0 y B_0 pueden tener, en principio, cualquier valor.
- * La O.E.M. emitida tiene la misma frecuencia que la de oscilación de la partícula cargada que la emite, por eso la frecuencia es una característica del movimiento, al cambiar de medio varían λ y v , manteniéndose la frecuencia.
- * En general. la luz emitida por un sólido está compuesta por muchas frecuencias diferentes, pues las partículas cargadas que la emiten vibran con frecuencias diferentes.
- * La intensidad media de una O.E.M. depende del cuadrado de la amplitud, es decir del cuadrado del valor máximo de los campos eléctricos y magnéticos que se propagan.

$$Intensidad = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c} = E_0 \cdot B_0 / 2\mu_0$$

- * La energía asociada a una onda depende además de la superficie y del tiempo.

$$Energía = Intensidad \cdot Superficie \cdot tiempo$$

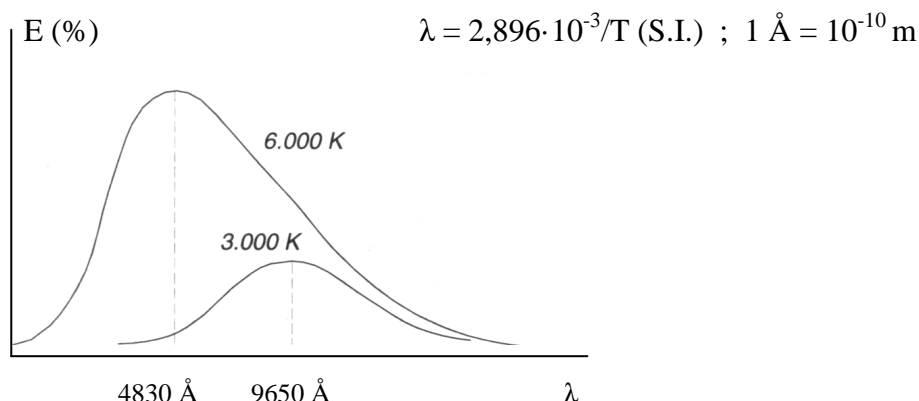
Pero había dos fenómenos que la teoría electromagnética no podía explicar: la radiación del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico. La teoría electromagnética no podía explicar las características de la radiación emitida por un cuerpo cuando se aumenta su temperatura, y tampoco podía explicar las características de los electrones emitidos por un metal cuando sobre el metal inciden luces de diferentes longitudes de onda y de diferentes intensidades

2. LA RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO

De forma experimental sabemos que los cuerpos emiten más energía por radiación cuanto mayor es la temperatura a la que se encuentran. Además la energía radiada depende también de la naturaleza de la superficie emisora: una superficie clara y brillante emite menos energía que una superficie oscura y mate. Además aquellas superficies que son buenas emisoras de radiación son también buenas receptoras. Por **cuerpo negro** se entiende aquel que tiene el máximo poder emisor y el máximo poder absorbente. La radiación emitida por un cuerpo negro (en general por cualquier cuerpo), es de muy diferentes longitudes de onda. Si se analiza la energía emitida por un cuerpo negro a diferentes temperaturas se obtiene una gráfica como la de la figura. En ordenadas se representa el % de la energía emitida que corresponde a la longitud de onda representada en la abscisa.

En la gráfica se observa que, cuando aumentamos la temperatura, la longitud de onda a la que corresponde el mayor porcentaje de la radiación emitida es cada vez menor.

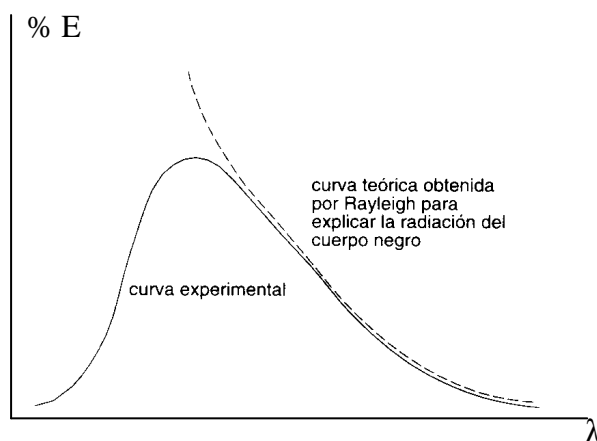
Hay una relación matemática, conocida como ley de desplazamiento de Wien, que relaciona la longitud de onda a la que corresponde el mayor porcentaje de radiación emitida y la temperatura a la que se encuentra el cuerpo:



LA CATÁSTROFE DEL ULTRAVIOLETA

Cuando se intentó obtener una ecuación que fuese capaz de representar las curvas, obtenidas de forma experimental de la radiación del cuerpo negro, se encontró que esto no era posible aplicando la teoría de la radiación electromagnética propuesta por Maxwell.

Lo más que se consiguió era una expresión matemática que era válida para la zona de la curva que se corresponde con las longitudes de ondas más largas, pero que para las longitudes de onda pequeñas, la que corresponde a la zona de las radiaciones ultravioletas, no se ajustaba para nada con la curva experimental.



La curva a puntos la obtiene Rayleigh basándose en consideraciones clásicas. En su época, este problema teórico supuso un pequeño fracaso de la teoría electromagnética clásica de Maxwell.

HIPÓTESIS DE PLANCK

Estudiando el mismo problema, Max Planck obtuvo, en 1900, una función que sí representaba adecuadamente los datos obtenidos de forma experimental. En esa ecuación aparece una constante que no tenía un significado en la teoría electromagnética clásica. Para llegar a esa ecuación Planck tuvo que introducir una nueva hipótesis que no tenía justificación a partir de los postulados de la teoría electromagnética clásica. Esa hipótesis fue:

“El contenido energético de una carga (en realidad un grupo de cargas u osciladores) en movimiento armónico simple, de frecuencia f , sólo puede ser múltiplo de la magnitud hf ”.

h es la constante de Planck cuyo valor es $6.63 \cdot 10^{-34}$ J·s

Como la energía emitida en la radiación electromagnética corresponde a las vibraciones de las cargas en los átomos, la energía emitida por radiación está “cuantizada”. Al valor mínimo posible de energía emitida para la frecuencia f , hf , se le llama **cuanto de energía**¹. Cualquier energía emitida será múltiplo entero de esa cantidad :

$$\text{Energía} = n \cdot hf$$

La curva experimental se explica porque estadísticamente la mayoría de los osciladores oscilarán con la frecuencia para la que se obtiene el máximo, aunque habrá osciladores oscilando para todos los valores de frecuencias, por eso se obtenía energía para todas las frecuencias. El intercambio de Energía entre la radiación y la materia no tiene lugar de forma continua, $E_{\text{intercambiada}} = n \cdot hf$. La radiación no se emite de forma continua sino por medio de cuantos o paquetes de energía cuyo valor depende de la frecuencia de la radiación, el valor de cada cuanto es hf y eso es un fotón.

Debemos señalar que la hipótesis de Planck tuvo al principio un carácter matemático, sin un significado físico muy preciso. Solamente después de que Einstein lo aplicara para la explicación del efecto fotoeléctrico y que Bohr lo tuviera en cuenta cuando hablaba de la cuantización de las órbitas electrónicas, fue cuando se le concedió una importancia como teoría física. De hecho, a Max Planck no se le concedió el premio Nobel hasta el año 1918, cuando se comprobó la importancia de su hipótesis de los cuantos en la explicación de diversos fenómenos. La hipótesis de Planck suponía una ruptura con el electromagnetismo clásico al suponer que la energía de un sistema de partículas cargadas con m.a.s. no podía tomar cualquier valor sino que sólo podía ser múltiplo de unos determinados valores. En la teoría electromagnética clásica, la energía de una partícula cargada podía tomar cualquier valor dentro de un intervalo continuo de valores.

PR.1.- Calcula el cuanto de energía de cada uno de los siguientes tipos de radiación:

- Una onda de radio cuya longitud de onda es de 100 metros.
- Una radiación infrarroja cuya longitud de onda es de 0,01 mm.
- Luz visible de color naranja cuya longitud de onda es 6.000 Å.
- Radiación ultravioleta cuya longitud de onda es 500 Å.
- Rayos X cuya longitud de onda es 1 Å.

El cuanto de energía depende de su frecuencia: $E = hf$. La frecuencia está relacionada con la velocidad y con la longitud de onda. Como todas las radiaciones tienen la misma velocidad, que en el vacío es 300.000 km/s, la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda.

$$\lambda = c/f \quad f = c/\lambda$$

$$\text{Para calcular el cuanto de energía: } E = h \cdot c/\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{\lambda} = \frac{19,89 \cdot 10^{-26}}{\lambda} \text{ J}$$

¹ Dado el valor tan pequeño que tienen los distintos cuantos de energía, conviene utilizar una unidad de acuerdo con dicho valor. Esa unidad es el electrónvoltio (eV), que es la energía que tiene una carga igual a la del electrón cuando pasa de un punto a otro entre los que la d.d.p. es de 1 voltio, $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

*Los cuantos de energía también reciben el nombre de **fotones**.

Para expresar la energía en electronvoltios se debe tener en cuenta que $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, lo que lleva a:

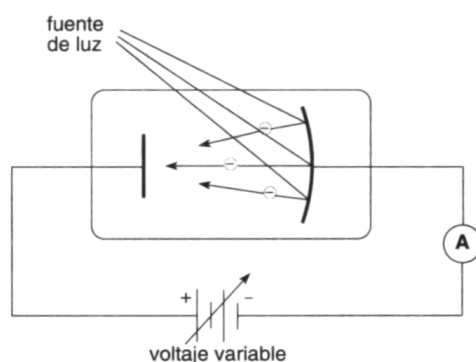
$$E = \frac{19,89 \cdot 10^{-26}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \lambda} = \frac{12,4 \cdot 10^{-7}}{\lambda} \text{ eV}$$

- a) onda radio $\lambda = 100 \text{ m}$ $E = 1,99 \cdot 10^{-27} \text{ J} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ eV}$
- b) infrarrojo $\lambda = 10^{-5} \text{ m}$ $E = 1,99 \cdot 10^{-20} \text{ J} = 0,12 \text{ eV}$
- c) luz naranja $\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ $E = 3,32 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2,1 \text{ eV}$
- d) ultravioleta.....
- e) rayos X

3. EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

Este fenómeno fue descubierto por **Hertz** en el año 1887 cuando estaba estudiando la producción y propagación de ondas electromagnéticas. Como ya hemos indicado, el efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por una lámina metálica, cuando sobre ésta incide la luz.

En principio podría pensarse que el proceso de emisión de electrones a causa de la luz sería fácilmente explicado por la teoría electromagnética de **Maxwell**, considerando la luz como una onda electromagnética. La explicación sería que la onda electromagnética suministraría energía de forma continua hasta que el electrón tuviese la suficiente como para escapar del átomo. El problema surge cuando se tienen en cuenta los datos experimentales asociados con el efecto fotoeléctrico. Entre las características más destacadas podemos señalar las siguientes:



- A) El que exista o no emisión de electrones NO depende de la intensidad luminosa,
- B) El que exista o no emisión de electrones sí depende de la frecuencia de la luz.
- C) La luz de una determinada frecuencia que es capaz de arrancar electrones de un metal no es capaz de arrancar electrones de otro metal diferente.
- D) El número de electrones emitidos depende de la intensidad de la luz incidente.
- E) La energía cinética que adquieren los electrones emitidos no depende de la intensidad luminosa pero sí depende de la frecuencia de la radiación incidente.
- F) El tiempo transcurrido entre la llegada de la luz y la emisión del electrón es muy pequeño, del orden del nanosegundo.

La solución al problema la proporcionó **Einstein** en el año 1905, utilizando la hipótesis cuántica que Planck había propuesto en el año 1900. Recordemos que Planck, para explicar la radiación del cuerpo negro, había supuesto que las cargas que vibraban sólo podían tener unas energías determinadas, **múltiplos de la frecuencia de vibración multiplicados por “h”**. Esta hipótesis, que **Planck** había propuesto sólo como una conjetura matemática para obtener una ecuación matemática que se ajustara a la curva experimental de la radiación del cuerpo negro fue asumida plenamente por **Einstein**, el cual no la consideró como un artificio matemático sino que **supuso que la energía está realmente cuantizada, que se emite en pequeños paquetes o corpúsculos, llamados**

cuantos, cuyo valor depende de la frecuencia de vibración, que se transmite formando esos pequeños cuantos y que, cuando interacciona de nuevo con la materia, se comporta como si fueran pequeños paquetes de energía, discontinuos, como una especie de pequeños átomos de energía.

Admitiendo la naturaleza cuántica de la radiación, la interpretación de los datos experimentales referidos al efecto fotoeléctrico es relativamente fácil.

- a) La energía necesaria para arrancar un electrón la llamamos función trabajo o potencial de extracción y depende del metal que estemos considerando. Dado que el choque se realiza entre un fotón y un electrón, sólo habrá emisión de electrones cuando la energía del fotón incidente supere la energía necesaria para arrancar al electrón del metal. Es decir, que $hf > hf_0$, donde hf es la energía del fotón y hf_0 es la energía mínima que tiene que tener para arrancar el electrón, es decir, es igual al potencial de extracción².
- b) El hecho de que aumente la intensidad no tiene nada que ver con el que haya o no emisión de electrones, ya que una mayor intensidad significa un mayor número de fotones, pero no que un fotón tenga mayor energía. Si la energía de un fotón no supera la energía necesaria para arrancar al electrón, no podremos arrancar al electrón aunque incidan sobre él varios fotones sucesivamente. (IMPORTANTE) → Sirve aquí el ejemplo de las bolas de ping-pong o una pedrada para arrancar fruto aún verde de un árbol.
- c) Si la luz en cuestión arranca electrones del metal iluminado, el número de electrones emitidos sí depende de la intensidad, ya que cada fotón arranca un solo electrón, y como mayor intensidad significa mayor número de fotones, habrá relación directa entre la intensidad luminosa y el número de electrones emitidos.
- d) La energía total del fotón incidente se emplea en arrancar al electrón y el resto se transforma en la energía cinética del electrón emitido.

energía del fotón = potencial de extracción + energía cinética del electrón

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2} m_e v^2$$

- e) Ya que para arrancar un electrón se necesita sólo un fotón, el proceso es casi instantáneo.

PR.2.- La función trabajo, (o potencial de extracción) del níquel es de 5,01 eV

- a) ¿ Para cuáles de las radiaciones analizadas en el PR.1 mostrará efecto fotoeléctrico el níquel?
- b) Si utilizamos UV de 1.000 Å, ¿ cuál será la energía cinética de los electrones extraídos ?
- c) Cuál será la diferencia de potencial que habrá que aplicar a esos electrones para pararlos?

- a) Dado que la función trabajo es la energía necesaria para extraer al electrón, sólo aquellas radiaciones compuestas por fotones que tengan una energía mayor que la función trabajo podrán extraer los electrones del níquel. De las radiaciones anteriores, sólo la radiación ultravioleta y los rayos X podrían extraer electrones del níquel.

² A la frecuencia f_0 , correspondiente al potencial de extracción se le llama frecuencia umbral.

b) Los fotones de la radiación UV de 1.000 \AA tienen una energía 12.43 eV (haz el cálculo oportuno). Cuando un fotón incide sobre un electrón, la energía del fotón se utiliza para extraer el electrón y, el resto, como energía cinética del electrón.

$$12.43 \text{ eV} = 5.01 + E_{\text{cinética}}; E_{\text{cinética}} = 7.42 \text{ eV}$$

c) Los electrones serán detenidos al aplicarles un campo eléctrico que ejerza sobre los mismos una fuerza en sentido contrario al movimiento. Dicho de otra forma, se detendrán cuando se ejerza sobre ellos una diferencia de potencial suficiente para contrarrestar la energía cinética:

$$E_{\text{cinética}} = 7.42 \text{ eV} \leq q(V_A - V_B) = e(V_A - V_B); (V_A - V_B) \geq 7.42 \text{ voltios}$$

4. DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO. HIPÓTESIS DE DE BROGLIE

El efecto fotoeléctrico o la radiación del cuerpo negro han dado una base firme a la teoría corpuscular de la luz. Pero, ¿qué pasa con la **teoría electromagnética de la luz**? No podemos olvidar que la teoría de **Maxwell** explicaba bien los fenómenos de interferencia, la difracción, etc., fenómenos que claramente nos sugieren que la luz tiene un carácter ondulatorio.

Unos experimentos indican que la luz se comporta como una onda; otros experimentos indican que se comporta como un chorro de corpúsculos. Estas dos teorías parecen ser incompatibles pero ambas han demostrado tener validez. Los físicos han llegado a la conclusión de que esta dualidad de la luz debe aceptarse como un hecho real. A esto se le da el nombre de **dualidad onda-corpúsculo**.

Para aclarar la situación, el gran físico danés Niels **Bohr** propuso su famoso **principio de complementariedad**. Dice que para comprender un experimento cualquiera debemos utilizar o la teoría ondulatoria o la teoría del fotón, pero no ambas.

No es posible visualizar esta dualidad. No podemos imaginar una combinación de onda y corpúsculo. En realidad, debemos darnos cuenta de que se trata de dos aspectos diferentes que presenta la luz a los experimentadores.

Es interesante señalar que la propia **ecuación de Einstein $E = hf$** , enlaza las propiedades corpusculares y ondulatorias de un haz luminoso. En esta ecuación, E es la energía de un corpúsculo; y el segundo miembro de la ecuación contiene la frecuencia f de la onda correspondiente.

HIPÓTESIS DE DE BROGLIE

En 1923, el francés Louis de Broglie amplió la idea de la dualidad onda-corpúsculo. Pensó que si la luz se comporta a veces como onda y a veces como corpúsculo, tal vez las cosas que se consideran corpúsculos, como los electrones, protones, bolas de tenis, etc., puedan tener propiedades ondulatorias.

De Broglie vio que al combinar la ecuación de Planck que permite calcular la energía de un fotón en función de su frecuencia con la ecuación de Einstein de la equivalencia masa-energía se obtenía la siguiente relación entre la longitud de onda del fotón (magnitud que puede simbolizar su carácter ondulatorio) y su cantidad de movimiento (producto de la masa por la velocidad, que puede simbolizar su carácter corpuscular):

$$\left. \begin{array}{l} E = hf \\ E = mc^2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} hf = mc^2 \\ \frac{c}{f} = \frac{h}{mc} \quad \lambda = \frac{h}{mc} \end{array}$$

La idea de De Broglie fue generalizar esa idea a los corpúsculos. En ese caso, la velocidad de la partícula sustituye a la velocidad de la luz, siendo la longitud de onda de esa partícula igual a:

$$\lambda = h/mv$$

PR.3.- ¿Cuál es la longitud de onda de De Broglie de un electrón cuya energía cinética es 100 eV?

Para calcular la longitud de onda necesitamos conocer la constante de Planck y el valor del momento lineal del electrón, es decir el valor del producto de su masa por su velocidad (mv)

El valor del momento lineal se puede obtener a partir de la energía cinética como sigue:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} \quad mv = \sqrt{2mE_c}$$

$$mv = \sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 100 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 5,4 \cdot 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

A partir de ese dato se obtiene fácilmente la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{5,4 \cdot 10^{-24}} = 1,23 \cdot 10^{-10} \text{ metros} = 1,23 \text{ Å}^{(3)}$$

Como se puede observar en los cálculos anteriores, la longitud de onda de un objeto ordinario es demasiado pequeña para ser medida y detectada. La dificultad está en que las propiedades de las ondas, tales como la interferencia y la difracción, sólo son apreciables cuando el tamaño de los objetos o rendijas no es mucho mayor que la longitud de onda. Y no se conocen objetos o rendijas que puedan difractar longitudes de onda tan pequeñas como la de los objetos ordinarios; por lo tanto, las propiedades ondulatorias de los objetos ordinarios no se detectan.

Sin embargo, para los electrones y otras partículas del mundo atómico, la longitud de onda de De Broglie, aunque muy pequeña, es del orden de distancias que sí conocemos en la naturaleza. Las longitudes de onda de los electrones son del orden del angström, distancia que es la que existe entre los átomos de un cristal. Así pues, utilizando un cristal como red de difracción podríamos observar las propiedades ondulatorias de los electrones. Esa experiencia se realizó hace ya mucho tiempo, y luego se ha repetido en diversas ocasiones y circunstancias. En el año 1927, C. J. Davisson y L.H. Germer realizaron el experimento de difractar electrones y cuando calcularon la longitud de onda que deberían tener esos electrones según las figuras de difracción obtenidas encontraron valores que concordaban con los que se obtienen a partir de la ecuación de De Broglie. Esta concordancia de los resultados experimentales con los previstos en la teoría de De Broglie dio un gran impulso a la misma. De Broglie obtuvo el premio Nobel en el año 1929. Posteriormente se han logrado difractar otras partículas como protones y neutrones, concordando siempre los valores experimentales con los teóricos previstos por la ecuación de De Broglie.

⁽³⁾ La λ de un objeto ordinario es del orden de 10^{-30} m.

EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO, APLICACIÓN DEL CARÁCTER ONDULATORIO DE LOS ELECTRONES

Poco después de producirse la confirmación experimental de las propiedades ondulatorias de los electrones, se pensó que éstos podrían utilizarse para ampliar objetos con un detalle mucho mayor que con el microscopio óptico ordinario. **La resolución de un microscopio está limitada por la longitud de onda de la radiación utilizada, un objeto que sea más pequeño que la longitud de onda de la radiación que utilicemos para iluminarlo producirá difracción de esa radiación y no dará imágenes en el microscopio.**

Dado que la longitud de onda de la luz visible, la que se utiliza en un microscopio óptico viene a ser de 4.000 \AA , mientras que la longitud de onda ⁽⁴⁾ de los electrones puede ser de alrededor de 1 \AA , la resolución que puede alcanzarse con un microscopio que utilice electrones en lugar de luz visible es bastante mayor. La contrapartida está en que el un microscopio electrónico es un aparato bastante más complejo que un microscopio óptico, aunque en la actualidad es un aparato de uso bastante generalizado en los laboratorios de investigación.

PR.4.- Calcula la diferencia de potencial necesaria para que en un microscopio electrónico se obtengan electrones con una longitud de onda de $0,5 \text{ \AA}$.

En el microscopio electrónico lo que se hace es utilizar electrones para poder “ver” a los objetos. Mientras mayor sea la diferencia de potencial que se utilice, mayor será la velocidad que alcanzarán los electrones y, por lo tanto, menor será la longitud de onda.

Lo que se hace es someter al electrón a una elevada diferencia de potencial para acelerarlo y poder así alcanzar altas velocidades.

En primer lugar, se debe calcular la velocidad que corresponde a electrones cuya longitud de onda es de $0,5 \text{ \AA}$.

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad v = \frac{h}{m\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 0,5 \cdot 10^{-10}} \approx 1,46 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

Si los electrones tienen esa velocidad tendrán la energía cinética correspondiente:

$$E_{\text{cinética}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (1,45 \cdot 10^7)^2 = 9,66 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

Esa energía cinética la deben adquirir siendo acelerados por una diferencia de potencial

$$1,6 \cdot 10^{-19} (V_A - V_B) = 9,66 \cdot 10^{-17}; \quad V_A - V_B = 604 \text{ V}$$

5. PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG

La dualidad onda-corpúsculo, la naturaleza corpuscular de la luz y la naturaleza ondulatoria de los electrones y demás partículas, así como la teoría de la relatividad (que no vamos a estudiar) han cambiado la concepción del mundo físico.

El principio de incertidumbre se refiere a la imposibilidad de conocer simultáneamente y con total exactitud los valores de dos magnitudes conjugadas de una misma "partícula-onda". Por magnitudes conjugadas se entienden aquellas cuyo producto tenga unidades de energía \cdot tiempo.

⁽⁴⁾ lógicamente se debe entender que hablamos de valores indicativos, ya que como sabes la longitud de onda de la luz visible varía en el rango de 4.000 a 8.000 \AA , mientras que la longitud de onda de un electrón depende de su velocidad, a mayor velocidad menor longitud de onda.

Como ejemplo, expresemos el principio de incertidumbre para dos pares de magnitudes:

$$\Delta(mv) \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \qquad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Si nos fijamos en la primera de ellas podemos interpretarla diciendo que no es posible medir de forma exacta y simultánea la cantidad de movimiento de una partícula (mv) y la posición que ésta ocupa (x), mientras con más exactitud queremos conocer la cantidad de movimiento (mv) de una partícula, mayor indeterminación tendremos en el conocimiento simultáneo de la posición (x) de dicha partícula. Lo mismo podríamos decir para la segunda expresión. No es posible medir de forma exacta y simultánea la energía intercambiada en un proceso (ΔE) y su duración (Δt). Cuanta mayor sea la precisión en la medida de la energía intercambiada en un proceso, mayor será el error cometido en la determinación simultánea del tiempo en que éste ocurre.

Dos precisiones conviene hacer. La primera es que el principio de incertidumbre no impide que podamos conocer con total exactitud el valor de una magnitud para una partícula determinada; se refiere a que no es posible hacerlo **simultáneamente**, para las **dos magnitudes conjugadas**. La segunda observación es aclarar que el origen de estas indeterminaciones nada tiene que ver con los “errores de medida” que se cometen cada vez que queremos determinar experimentalmente cualquier magnitud.

La incertidumbre que aparece no depende de la imprecisión de los aparatos, sino que deriva de las ideas fundamentales que hemos estudiado de la dualidad onda-corpúsculo, de la naturaleza ondulatoria de las partículas y de la necesidad de la interacción entre el observador y lo observado. La Mecánica Cuántica, la teoría que acoge todas estas ideas como principios fundamentales, está hoy profundamente aceptada y ella ha hecho posible avances tan importantes como los ordenadores, láseres, etc. Al no poderse determinar con precisión simultáneamente la posición y velocidad de una partícula como el electrón, no puede conocerse su órbita alrededor del núcleo, tal como postulaba la Física Clásica. La Mecánica Cuántica asigna a cada partícula una función de ondas, Ψ , cuyo cuadrado, Ψ^2 , indica la probabilidad de encontrar la partícula en una zona determinada del espacio. **Esta última idea nos lleva al concepto de orbital atómico.**

INTERACCIONES FUNDAMENTALES DE LA NATURALEZA

Cuando dos partículas interactúan, se cree que la fuerza se transmite por el intercambio de una partícula intermedia que es característica de esta fuerza. La intensidad de la misma está relacionada con el tiempo de intercambio y con la distancia a que puede realizarse. Se cree así mismo que el radio de acción o alcance de las interacciones es inversamente proporcional a la masa de las partículas intercambiadas.

INTERACCIÓN GRAVITATORIA

Fue propuesta por Newton en el siglo XVII. Su efecto es extraordinariamente débil a nivel de partículas elementales. Su acción se transmite a la velocidad de la luz mediante partículas virtuales (que no han sido detectadas) llamadas **gravitones**. Dado que el alcance de esta interacción es infinito se espera que esta partícula sea de masa nula.

INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Es la fuerza que liga los núcleos y los electrones, formando los átomos; la fuerza electromagnética residual une los átomos constituyendo moléculas. Es transmitida por los **fotones** (cuantos del campo electromagnético) y su alcance es infinito.

Estas dos interacciones explicaban todos los fenómenos conocidos hasta finales del siglo XIX. Su alcance ilimitado es la razón por la que nos resultan más familiares.

INTERACCIÓN DÉBIL

Es otro tipo de fuerza relacionada con las interacciones dentro del núcleo de los átomos. Se le llama débil porque su intensidad es alrededor de 10^{-15} veces más pequeña que las interacciones fuertes. No se conoce aún su naturaleza y solamente tienen importancia en algunos fenómenos que se dan en los núcleos de los átomos, como la desintegración β , según la cuál un neutrón se desintegra emitiendo un protón, un electrón y un neutrino.

La partícula intermediaria se llama **bosón intermediario o partícula W** (Weakon).

INTERACCIÓN FUERTE

Se introdujo para explicar la estabilidad del núcleo. Esta fuerza liga los quarks entre sí para formar protones y neutrones. La fuerza fuerte residual mantiene unidos a protones y neutrones en el núcleo. La partícula mediadora de esta interacción se llama **gluón**.

Se trata de una interacción extremadamente compleja que se conoce desde hace relativamente poco tiempo. Las características de las fuerzas nucleares que se ponen de manifiesto en la interacción fuerte las podemos resumir así:

- No dependen de la carga de las partículas: es la misma entre dos protones o entre dos neutrones o entre un protón y un neutrón.
- Son atractivas para distancias del orden de $4 \cdot 10^{-16}$ m, para distancias menores son repulsivas.
- Se ponen de manifiesto en distancias muy cortas. Para distancias superiores a 10^{-15} m son de intensidad despreciables.
- No son fuerzas centrales, es decir no están dirigidas en la dirección de la recta que une las partículas.

Las distintas interacciones se pueden clasificar en **orden creciente de intensidad** como sigue: Gravitatoria, débil, electromagnética y fuerte.